

RÉFÉRENCES

1. Preston RJ, Boice JD Jr, Brill AB, et al. Uncertainties in estimating health risks associated with exposure to ionising radiation. *J Radiol Prot* 2013;33:573-88.
2. Mohan AK, Hauptmann M, Freedman DM, et al. Cancer and other causes of mortality among radiologic technologists in the United States. *Int J Cancer* 2003;103:259-67.
3. Metz-Flamant C, Laurent O, Samson E, et al. Mortality associated with chronic external radiation exposure in the French combined cohort of nuclear workers. *Occup Environ Med* 2013;70:630-8.
4. Cardis E, Gilbert ES, Carpenter L, et al. Effect of low dose rates of external ionizing radiation : cancer mortality among nuclear industry workers in three countries. *Radiat Res* 1995;142:117-32.
5. Daniels RD, Bertke S, Waters KM, Schubauer-Berigan MK. Risk of leukaemia mortality from exposure to ionising radiation in US nuclear workers: a pooled case-control study. *Occup Environ Med* 2013;70:41-8.
6. Krestinina LY, Davis FG, Schonfeld S, et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953-2007. *Br J Cancer* 2013;109:2886-93.
7. Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950-2003 : an overview of cancer and noncancer diseases. *Rad Res* 2012;177:229-43.
8. Zablotska LB, Lane RS, Frost SE, Thompson PA. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma mortality (1950-1999) and incidence (1969-1999) in the Eldorado uranium workers cohort. *Environ Res* 2014;130:43-50.
9. Pukkala E, Helminen M, Haldorsen T, et al. Cancer incidence among Nordic airline cabin crew. *Int J Cancer* 2012;131:2886-97.
10. Ivanov VK, Tsyb AF, Khait SE, et al. Leukemia incidence in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers. *Radiat Environ Biophys* 2012;51:143-9.
11. Pédrone G, Pachol H, Ségala C. Étude de mortalité des vétérans ayant bénéficié d'une surveillance dosimétrique lors des essais nucléaires français dans le Pacifique. *Rev Epidemiol Sante Publique* 2011;59:187-96.
12. Bey P, Gérard JP, Schlumberger M. Faut-il avoir peur de la radioactivité ? Paris : Odile Jacob, 2013.

RÉSUMÉ Risques professionnels liés aux rayonnements ionisants et surveillance des personnes exposées

En France, environ 400 000 personnes sont exposées professionnellement aux rayonnements ionisants, surtout dans le monde médical ou industriel. En dehors des accidents les doses reçues sont très faibles, bien en dessous de l'irradiation naturelle à Paris (2,5 mSv). Les études épidémiologiques en milieu professionnel montrent que le risque de cancer ou de leucémie radio-induits est « négligeable ». En l'absence de mesure de radioprotection les radiologues interventionnels peuvent recevoir des doses dépassant 20 mSv responsables de cataracte. En cas d'accident nucléaire les sauveteurs peuvent recevoir des doses potentiellement mortelles. Dans l'industrie, des accidents peuvent entraîner des irradiations locales très fortes, sources de nécrose tissulaire nécessitant une prise en charge spécialisée. Le respect des règles de radioprotection, sous la responsabilité du chef d'entreprise, doit permettre de travailler sans danger au sein de l'établissement.

SUMMARY Occupational hazard related to ionizing radiation and surveillance of exposed people

In France, around 400 000 persons are occupationally exposed to ionizing radiations especially in the field of medicine or industry (nuclear plant or other). Outside of accident the effective doses received are low and below the natural annual exposure dose in Paris (2,5 mSv). Epidemiological studies show that in the occupational environment the excess risk of cancer or leukemia related to ionizing radiations is negligible. Doctors performing interventional radiology if not taking safety measures may receive doses above 20 mSv responsible for lens opacity. In case of nuclear plant accident the emergency workers and liquidators may receive life-threatening whole body doses. In general industry accident may be responsible for high local dose and severe radiation necrosis which required a highly sophisticated treatment. Strict observance of radiation safety rules under the responsibility of the head of the company or institution must provide a safe professional environment.

HIROSHIMA, NAGASAKI, TCHERNOBYL ET FUKUSHIMA

Conséquences sanitaires des événements nucléaires majeurs

Jacques Orgiazzi

Service d'endocrinologie-diabétologie-maladies de la nutrition, centre hospitalier Lyon-Sud, Hospices civils de Lyon et université Claude-Bernard Lyon 1, 69000 Lyon, France.
jacques.orgiazzi@chu-lyon.fr

On trouve aisément sur Internet (<http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>) la liste de tous les événements nucléaires, essais militaires, catastrophes et accidents civils avec pour ces derniers leur classement selon l'*International Nuclear Event Scale* (échelle INES) en 8 niveaux notés de 0 à 7 en fonction de leur gravité ou de la quantité de contami-

nants rejetés selon une échelle logarithmique dont le pas est de 10. Il faut noter que la catastrophe de Tchernobyl, dont les rejets ont dépassé d'un facteur 100 le seuil du niveau 7, n'a pas conduit à extrapoler l'échelle au niveau 9.

Trois « événements » nucléaires ont été sélectionnés pour présenter ici, en particulier chez les survivants des bombardements atomiques, les pathologies

induites au long cours par les diverses modalités d'irradiation.

Bombardements atomiques (Hiroshima et Nagasaki, 6 et 9 août 1945)

Au-delà des 210 000 morts constatés dans les deux premiers mois, dont un tiers environ sont attribuables aux conséquences de l'irradiation aiguë, l'*Atomic Bomb Casualty Commission* (ABCC), créée en 1947 et devenue en 1975 la *Radiation Effects Research Foundation* (RERF), suit annuellement ou plus, une cohorte de 212 100 sujets

ayant survécu aux bombardements, dont 120 231 personnes irradiées et leurs contrôles (constitués de la totalité de la population du Japon), ainsi que 3 289 sujets qui étaient *in utero* au moment du bombardement et 76 814 personnes nées d'au moins un parent irradié (v. p. 86). Les données chiffrées sont exhaustives depuis 1950, avec une dosimétrie individuelle reconstituée de l'irradiation par rayons gamma et neutrons.¹

Les principales pathologies observées sont :

– **les leucémies**, les plus précoces. De 1950 à 2002, 315 décès par leucémie avaient été répertoriés, dont 98 attribuables à l'irradiation chez des sujets ayant reçu une dose d'au moins 5 milligrays (mGy). La relation dose-risque de leucémie n'est pas linéaire mais incurvée vers le haut, le risque étant de 86 % pour les doses supérieures à 1 Gy. Outre la précocité de leur survenue, la majorité des cas mortels de leucémie sont survenus chez les irradiés les plus jeunes et aux doses les plus fortes. À noter enfin que, même 60 ans après le bombardement, persiste un risque de syndrome myélodysplasique proportionnel à la dose reçue ;

– **un excès de risque de tumeur solide** a été démontré pour de nombreux organes (cavité buccale, œsophage, estomac, côlon, foie, poumon, peau, glande mammaire, ovaire, vessie, cerveau, thyroïde). Compte tenu de l'exposition de l'ensemble du corps aux radiations pénétrantes, de très nombreux organes ont pu être affectés, avec un risque relatif plus élevé pour les cancers du sein, de la vessie et du poumon. Le risque de cancer radio-induit se développe après une période de latence de plusieurs années et montre, comme les cancers spontanés, une progression linéaire avec l'âge. Globalement, le risque est de 50 % plus élevé chez les femmes que chez les hommes, et deux fois plus élevé si l'irradiation est survenue dans l'enfance avant 10 ans qu'après 40 ans. La relation dose-risque est linéaire pour les doses comprises entre 0,2 et 2 Gy. Comme le montre le tableau p. 94 pour les tumeurs du côlon,

2 % des cas sont attribuables à l'irradiation dans la gamme de doses 0,005 à 0,1 Gy (dose moyenne : 0,03 Gy), mais cette proportion passe à 12 % au seuil de 0,1 Gy. Finalement, en valeur absolue, parmi les 17 448 nouveaux cas de cancers observés dans la cohorte de plus de 120 000 sujets, irradiés et contrôles, 853 cas sont attribuables à l'irradiation, soit 11 % des cancers survenus chez les survivants exposés à plus de 0,005 Gy. La majorité des cancers attribuables sont apparus après des doses supérieures à 0,2 Gy, le risque augmentant avec la dose pour atteindre une proportion de 48 % au-delà de 1 Gy (v. tableau) ;

– **parmi les pathologies non tumorales**, on peut noter le risque de cataracte de 39 % pour une dose de 1 Gy, mais aussi de sévères perturbations de l'équilibre psychosomatique des survivants.

Accident de Tchernobyl (26 avril 1986)

Il s'agit de l'accident nucléaire le plus sévère à ce jour, résultat d'une erreur humaine, au cours d'une expérience mal conçue, avec un réacteur insuffisamment protégé. La surchauffe du réacteur, son incendie et l'explosion de sa couverture ont libéré dans l'atmosphère pendant 10 jours un total de 10^{19} becquerels (Bq) de composés radioactifs de plusieurs types (xenon 133, tellurium 132, neptunium 239, iode 133 et 135 de demi-vie trop brève pour avoir des conséquences pathologiques sauf pour la population voisine immédiate), $1,2-1,8 \times 10^{18}$ Bq d'iode 131 (période 8 jours) et $1,4 \times 10^{17}$ Bq de césium 134 (période 2 ans) et 137 (période 30 ans) et de strontium 89 et 90 (période 28 ans). La contamination régionale (Biélorussie, Ukraine, partie ouest de la Fédération de Russie) a été très importante et les retombées radioactives ont touché, de façon variable, toute l'Europe. La gravité de la situation a été dramatiquement alourdie par l'absence de communication et d'information, donc de mise en œuvre immédiate des mesures de protection des populations (confinement ou éva-

cuation selon les cas, précautions alimentaires, distribution d'iode).

Effets immédiats

Irradiation aiguë. Les personnes présentes sur le site ont été soumises à de fortes doses d'irradiation « corps entier » : 150 environ ont eu un syndrome d'irradiation aiguë avec atteintes de la peau, de la moelle osseuse et des intestins ; 28 sont mortes dans les quatre premiers mois, mais au total, la mortalité, dans ce groupe, a été de plus de 50 %, en particulier du fait de syndromes myélodysplasiques.

Exposition aux retombées. Les personnes soumises aux retombées radioactives, en revanche, n'a pas eu d'effets directement liés à l'irradiation pendant les cinq années suivantes. Cependant, les conséquences psychologiques et sociales ont été dévastatrices.²

Effets secondaires

Cancer de la thyroïde

En 2006, 20 ans après l'accident, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA) ont fait état de plus de 4 000 cas de cancer de la thyroïde développés en Biélorussie, en Ukraine et dans les régions contaminées de la Fédération de Russie chez des sujets âgés de moins de 10 ans au moment de l'accident. Actuellement, le nombre de cas à rattacher à l'accident est évalué à environ 7 000.^{3,4}

Cinq points doivent être précisés :

– les premiers cas, observés chez des enfants dès 1989-1990, n'ont pas été considérés comme pouvant être attribués à l'irradiation compte tenu du délai de 10 ans observé dans les cas de cancer thyroïdien survenant après radiothérapie cervicale externe et du dogme de la faible carcinogénicité de l'iode 131 ; mais la survenue de nouveaux cas, exceptionnels chez l'enfant et dans des zones touchées par les retombées radioactives, a confirmé la réalité d'une véritable « épidémie » due à l'irradiation ;

– il existe une forte

Suite p. 96

Prévention des cancers de la thyroïde par l'iode stable en cas d'accident nucléaire

Jacques Orgiazzi*

* Service d'endocrinologie-diabétologie-maladies de la nutrition, centre hospitalier Lyon-Sud, Hospices civils de Lyon et université Claude-Bernard Lyon 1, 69000 Lyon, France.
jacques.orgiazzi@chu-lyon.fr

La législation française s'est préparée à intervenir pour protéger les populations des irradiations qui pourraient résulter des rejets et émissions de substances radioactives lors d'accidents nucléaires.¹ Au niveau européen, la démarche est similaire.²

Sous l'autorité du préfet, les trois mesures essentielles de protection – en fonction des niveaux d'intervention fixés par la décision n° 2009-DC-0153 de l'Autorité de sûreté nucléaire homologuée par le ministre de la Santé – sont :

- l'évacuation en cas de prévision d'exposition supérieure à 50 millisieverts (mSv) corps entier ;
- la mise à l'abri, ordonnée dans un contexte d'urgence, en cas de prévision d'exposition supérieure à 10 mSv « corps entier » ;
- la prise d'iode stable en cas de prévision d'exposition de la thyroïde supérieure à 50 mSv.

La mise en œuvre des mesures repose sur la capacité d'alerte et d'information des populations précisant les consignes de sécurité, la maîtrise de l'ordre public et des flux, et la définition et le contrôle des zones d'application des mesures de protection.

La charge en iode stable prévient l'irradiation de la thyroïde par l'iode radioactif

Les isotopes radioactifs de l'iode sont l'un des principaux contaminants libérés en cas d'accident nucléaire. Après inhalation ou ingestion, les iodes radioactifs suivent le

même métabolisme que l'iode stable et s'accumulent dans la glande thyroïde, le réservoir d'iode de l'organisme.

L'irradiation qui en résulte est responsable d'un sur-risque de cancer de la thyroïde dont les caractéristiques, progressivement identifiées à partir des années 1950 et plus particulièrement après la catastrophe de Tchernobyl, sont maintenant connues. Le sur-risque est :

- fort chez le petit enfant et l'enfant, fortement réduit ou même inapparent au-delà de 40-50 ans ;
- proportionnel à la dose reçue à la thyroïde pour atteindre un facteur 7 pour la dose de 1 000 milligrays (mGy) ;
- nul ou inapparent pour les doses faibles inférieures à 100 mGy ;
- probablement modulé par une susceptibilité génétique.

Mais la physiologie montre que l'avidité de la thyroïde pour l'iode est réglée par le contenu de la glande en iode. Très forte en cas de carence en iode, elle est modérée quand l'apport quotidien est à la valeur normale de 150 µg (0,15 mg) par jour – en France, la médiane est de 136 µg/j. En cas de surcharge de la glande en iode, l'entrée de l'iode est bloquée (fig. 1)³ : une surcharge par 50 à 100 mg (dose 1 000 fois plus forte que l'apport quotidien) d'iode « froid » ou stable, c'est-à-dire non radioactif, peut bloquer l'entrée de l'iode radioactif dans la thyroïde. Ainsi, la prise d'iode « froid » est l'antidote de l'irradiation de la glande thyroïde en cas d'accident nucléaire. Pour que cette mesure soit

efficace, la chronologie et la dose de la charge en iode doivent être précisées.

Conduite pratique de la prise d'iode stable

La décision de prise d'iode relève des pouvoirs publics ; elle est diffusée par tout média approprié. Les pouvoirs publics indiquent le moment précis de la prise car l'efficacité de la mesure est optimale lorsque la prise est effectuée 2 heures avant l'exposition au rejet ; elle décroît ensuite sur environ 24 heures (fig. 1)³. Les pouvoirs publics indiquent aussi si l'évolution de la situation nécessite une deuxième prise. La décision de prophylaxie par l'iode est prise en cas de risque d'irradiation de la thyroïde à une dose supérieure à 50 mGy. Les comprimés d'iode (iodure de potassium [fig. 2]) sont disponibles chez tous les habitants et les structures situés dans un rayon de 10 km autour des installations présentant un risque d'exposition à des

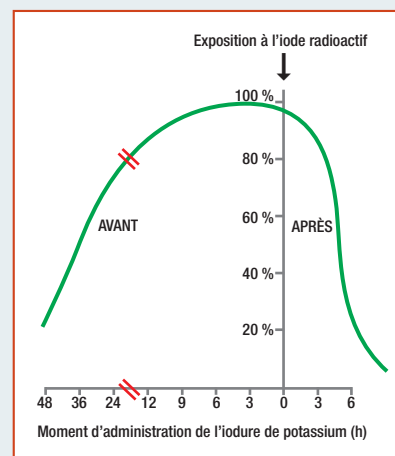


FIGURE 1 Inhibition du taux de captage de l'iode radioactif par la thyroïde, lorsqu'une charge d'iode « froid », de 50 à 100 mg, est administrée à des temps variables avant, ou après l'injection d'iode radioactif. D'après la réf. 3.

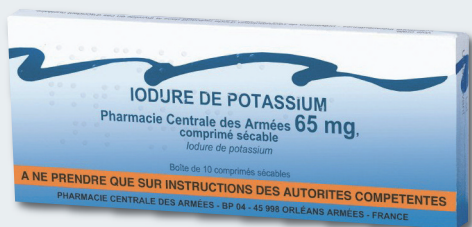


FIGURE 2 Boîte de comprimés d'iodure de potassium (65 mg/cp, soit 50 mg d'élément iode), telle que distribuée préventivement dans un rayon de 10 km autour des centrales nucléaires.

rejets contenant de l'iode radioactif (centrales nucléaires, réacteurs de recherche et bases navales). En outre, si nécessaire, une distribution est réalisable en situation d'urgence en tout point du territoire à partir des stocks départementaux et zonaux (plan ORSEC-iodé).

La dose est adaptée à l'âge : 100 mg pour les adultes et adolescents, 50 mg pour les enfants de 3 à 12 ans, 25 mg pour les enfants de 1 mois à 3 ans, 12,5 mg pour les nouveau-nés. Les comprimés sont à dissoudre dans un liquide approprié (jus de fruits, lait).

Les personnes concernées par la prise d'iode sont en priorité les nouveau-nés, les nourrissons et les enfants, les adolescents, les femmes enceintes et allaitantes, les

adultes jeunes ; au-delà de 50 ans, l'indication est moins formelle. Les effets indésirables (étudiés lors de la distribution de millions de doses d'iode aux populations polonaises après la catastrophe de Tchernobyl)^{4,5} sont rares (< 5 %), peu graves et transitoires (gastro-intestinaux [brûlures gastriques, nausées, vomissements, diarrhée], éruption cutanée, allergie vraie à l'iode [syndrome dyspnéique aigu, 2 cas ; pas de cas d'angio-œdème, d'arthralgies, de nécrose cutanée ou d'adénopathies...]) ; de rares cas d'« hypothyroïdie transitoire à l'iode » ont été observés chez des nouveau-nés. Il existe aussi un risque d'« hyperthyroïdie à l'iode ou *iod-Basedow* » chez les adultes ayant un goitre ancien autonome, d'âge supérieur à 50 ans en règle générale.

Mais, l'efficacité préventive de la prise d'iode est sans commune mesure avec la rareté ou le caractère mineur de ces effets indésirables. •

RÉFÉRENCES

1. Secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale/Premier Ministre. Plan national de réponse « Accident nucléaire ou radiologique majeur ». Numéro 200/SGDSN/PSE/PSN, février 2014. http://www.sgdsn.gouv.fr/site_rubrique146.html
2. Medical effectiveness of iodine prophylaxis in a nuclear reactor emergency situation and overview of European practices, European Commission Radiation Protection n° 165 ; Final Report of Contract TREN/08/NUCL/SI2.520028. Directorate-General for Energy Directorate D-Nuclear Energy Unit D4-Radiation Protection, 2010.
3. Zanzonico PB, Becker DV. Effects of time of administration and dietary iodine levels on potassium iodide (KI) blockade of thyroid irradiation by 131I from radioactive fallout. Health Phys 2000;78:660-7
4. Nauman J, Wolff J. Iodide prophylaxis in Poland after the Chernobyl reactor accident: benefits and risks. Am J Med 1993;94:524-32.
5. Zarzycki W, Zonenberg A, Telejko B, Kinalska I. Iodine prophylaxis in the aftermath of the Chernobyl accident in the area of Sejny in north-eastern Poland. Horm Metab Res 1994;26:293-6.

Suite de la p. 94 corrélation entre le risque de cancer thyroïdien et la dose reçue à la glande, de l'ordre de 5,5 à 8,4 par Gy, similaire à celle observée après irradiation externe, mais l'extrapolation de cette relation linéaire aux faibles ou très faibles doses d'irradiation n'est absolument pas établie, ce qui ne permet pas de transposer ce modèle aux régions distantes de Tchernobyl exposées à de très faibles retombées radioactives. Une récente étude finlandaise confirme l'absence d'impact démontrable d'une surexposition supérieure ou égale à 0,5 mSv/an;⁵ – le risque de cancer de la thyroïde est fortement corrélé à l'âge avec une forte décroissance du risque après l'âge de 5 ans, probablement liée à l'augmentation progressive du volume de la glande

et peut-être à une réduction de la radiosensibilité. De nouveaux cas de cancers radio-induits continuent d'apparaître plus de 25 ans après l'accident. Un volume thyroïdien accru ou un goitre, la présence de nodules et un taux élevé de thyroglobuline sérique sont des facteurs prédictifs ; – la carence en iode, relativement prévalente dans la région à l'époque, et l'absence de distribution d'iode stable ont été des facteurs favorisant démontrés, de même que, mais indépendamment, une susceptibilité génétique suggérée peut-être par une concordance familiale ; – dans plus de 95 % des cas, il s'agit de cancers papillaires différenciés qui guérissent après traitement dans au moins 90 % des cas ; leurs caractéristiques histologiques et moléculaires

sont en partie liées à l'âge des sujets et au délai d'apparition après l'irradiation ainsi qu'au statut iodé.

Autres pathologies

Leucémies. Les études conduites chez les personnes qui ont travaillé dans ou à proximité de la centrale de 1986 à 2006 (« liquidateurs ») ont montré un risque accru de leucémie. En dehors du cas de ces personnes, aucune preuve de leucémies radio-induites n'a été mise en évidence.

Autres cancers. Compte tenu de la difficulté des études épidémiologiques rigoureuses contrôlées et des nombreux facteurs interférents, dont la susceptibilité génétique, mais aussi la tendance au surdépistage, aucun résultat indiscutable n'a permis de démontrer jusqu'à présent l'apparition de cancers radio-induits

dans les populations que certains modèles mathématiques laissent toutefois prévoir. Il est surtout important de surveiller à long terme les populations soumises à irradiation par comparaison avec des groupes contrôles. Des programmes sont en cours.⁶

Pathologies cardiovasculaires et cataracte. Des études parcellaires ont rapporté une augmentation de l'incidence de ces pathologies dans les populations irradiées, mais, là encore, les conclusions ne sont pas définitives du fait de l'absence de groupes contrôles.

Autres domaines. Les retombées d'accidents de l'importance de celui de Tchernobyl sont multiples aux niveaux psychologique et socio-économique, avec des conséquences possibles, directes ou indirectes, sur la santé. Le risque potentiel de malformations fœtales a généré une inquiétude majeure largement relayée dont on peut rapprocher la forte diminution du nombre des naissances en Ukraine et en Biélorussie. Toutefois, la réalité d'une augmentation de l'incidence de malformations congénitales n'a pas été démontrée, ce qui rejoint les données des niveaux d'irradiation cumulés de 1986 à 1997, très inférieurs à 50 mSv pendant la durée d'une grossesse, même dans les zones les plus contaminées.⁷

Catastrophe de Fukushima (11 mars 2011)

Le séisme de magnitude 9, d'épicentre situé dans l'océan Pacifique à 163 km au nord-est de Fukushima, a déclenché un tsunami d'une série de 7 vagues, la plus haute de plus de 40 m, qui a touché la côte une heure plus tard, envahi le site de la centrale de Fukushima Daiichi et submergé une bande de terre de 561 km² sur une profondeur de 10 km faisant en quelques minutes 25 000 victimes ou disparus. L'inondation a interrompu les systèmes de refroidissement de la centrale, ce qui, malgré l'arrêt automatique des réacteurs au moment du séisme, a initié la série d'événements qui ont endommagé 4 des 6 réacteurs de la

Estimation de la proportion des cancers du côlon incidents (période 1958-1998) attribuables à l'irradiation, en fonction de la dose d'irradiation reçue.			
Doses reçues au niveau du côlon (Gy)		Cas en excès / cas observés	
Domaine	Moyenne	Nombres	%
≥ 0,005	0,21	850 / 7 851	11
0,005-0,1	0,03	81 / 4 406	2
0,1-0,5	0,24	254 / 2 112	12
0,5-1,0	0,70	206 / 688	30
≥ 10	1,62	307 / 645	48

D'après la réf. 1.

centrale et conduit à l'explosion des enceintes de confinement des réacteurs. Le rejet total de radioactivité a été de l'ordre de $5,2 \times 10^{17}$ Bq, environ 10 fois moins qu'à Tchernobyl, plus de 80 % des rejets ayant été déversés dans l'océan. En particulier, les rejets d'iode 131 et des césiums radioactifs ont représenté le dixième de ceux de Tchernobyl. Les recommandations aux populations, en particulier de sécurité alimentaire, et les évacuations ont été mises en œuvre rapidement.

Doses reçues

Aucun cas de syndrome d'irradiation aiguë n'a été observé parmi les équipes d'urgence sur le site. Les données disponibles (IAEA, OMS) indiquent que, parmi les 20 000 personnes qui ont travaillé sur le site, 146 ont reçu une dose supérieure à 100 mSv, 6 ont reçu une dose supérieure à 250 mSv, 2 ont reçu une dose supérieure à 600 mSv et 2 autres une dose à la peau de 2 à 3 Sv. Pour ces 20 000 personnes, la prévision des cas de cancers induits, c'est-à-dire de « cancers en excès », a été évaluée de 2 à 12, une contribution qui n'émergera statistiquement pas de l'incidence spontanée.⁸

Pour les populations évacuées durant les jours suivant la catastrophe, puis le mois suivant, et sans entrer dans les détails méthodologiques, les doses d'irradiation externe ont été inférieures à 5 mSv dans 97,4 % des cas, la dose maximum ayant été de 15 mSv. Chez 99,3 % des 386 572 personnes de la préfecture

de Fukushima analysées les doses ont été inférieures à 3 mSv.

Les doses reçues à la thyroïde ont été mesurées par détecteur à scintillation dans deux études:⁹

- 95,7 % des 315 enfants de moins de 15 ans testés du 26 au 30 mars 2011 ont reçu moins de 10 mSv, la dose maximum ayant été de 35 mSv ;
- chez 62 sujets contaminés par inhalation, évacués de zones proches de la centrale et étudiés du 12 au 16 avril 2011, la dose médiane était respectivement de 4,2 et 3,5 mSv pour les enfants et les adultes, la dose maximum étant de 23 et de 33 mSv ; les doses ont été inférieures à 10 mSv chez 95,7 % des enfants.

Toutes ces doses sont inférieures au seuil d'intervention (administration d'iode) recommandé par les organisations internationales qui est de 50 mSv.

Suivi de la population

Concernant les aspects sanitaires spécifiques de la catastrophe de Fukushima, et en dehors des drames et des conséquences psychologiques et sociales sur la population, deux éléments sont à prendre en compte dans les suites de la catastrophe : l'environnement, ce qui inclut la contamination des sols ainsi que des eaux littorales et les mesures à prendre dont le contrôle « radiologique des aliments » ; l'impact futur sur la thyroïde.

L'éventuel impact sur la thyroïde de la catastrophe est pris en charge à travers un vaste programme d'examen et de surveillance échographiques de la thyroïde

lancé en octobre 2011 (*Fukushima Medical University*), devant inclure 360 000 personnes de la préfecture de Fukushima âgées de moins de 18 ans au moment de la catastrophe. Au 31 juillet 2013, 9 des 10 personnes opérées parmi les 41 296 testées avant avril 2012 avaient un cancer papillaire, soit une prévalence de 220/10⁶ quand l'incidence clinique chez l'enfant, sans dépistage, est de l'ordre de 1/10⁶ par an. Sur le total cumulé des 177 000 jeunes testés à la fin de 2012, ce sont 44 cas de cancer qui ont été répertoriés, prévalence similaire de 248/10⁶. En raison du délai minimum de 3 ans dans le cas de Tchernobyl, l'attribution à l'irradiation de ces cas de cancer est très douteuse ; il faut plutôt y voir un effet de la « surdéttection ». Globalement, compte tenu du niveau d'irradiation de la thyroïde et de toutes les observations tirées des événements radiologiques passés, on peut prévoir que, dans les 50 prochaines années, le dépistage systé-

matique identifiera un cancer thyroïdien dans 2 % de la population testée, le risque spécifique de cancer radio-induit parmi les quelques dizaines de milliers de personnes de la préfecture de Fukushima les plus exposées étant au maximum de l'ordre de 0,2 %.

Perspectives

Dans ce bref aperçu des conséquences sanitaires d'événements nucléaires survenus sur une période de près de 70 ans, dans des circonstances très diverses, on a privilégié l'apport des études épidémiologiques et de radiophysique par rapport à celles de radiobiologie. Il est important de voir qu'en croisant, dans ces études très prolongées, les évaluations, et même les réévaluations tardives, des niveaux d'exposition aux radiations avec les données d'une épidémiologie minutieuse, on parvient à construire des modèles convaincants d'interaction dose-effets modulés en fonction de facteurs divers

(type de tissu/organe, âge à l'irradiation, âge de survenue de l'effet, environnement, facteurs familiaux...). En particulier, des recommandations très récentes pour une meilleure évaluation des doses reçues dans diverses conditions d'exposition sont maintenant disponibles.¹⁰ Mais il persiste une incertitude majeure en ce qui concerne la pertinence d'extrapoler aux faibles ou très faibles doses de radiations les risques observés aux doses fortes. La poursuite des études est nécessaire et, pour cette question précise, les données des irradiations médicales à visée diagnostique doivent être prises en compte.¹¹ •

J. Orgiazzi déclare avoir été pris en charge par le laboratoire Merck Serono pour la préparation du symposium national « Thyroïde ».

REMERCIEMENT

Je remercie le professeur Pierre Bey pour la revue critique synthétique et constructive de ce texte.

RÉFÉRENCES

1. Double EB, Mabuchi K, Cullings HM, et al. Long-term radiation-related health effects in a unique human population: lessons learned from the atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki. *Disaster Med Public Health Prep* 2011;5:S122-33.
2. Bromet EJ. Mental health consequences of the Chernobyl disaster. *J Radiol Prot* 2012;32:N71-5.
3. Williams D. Twenty years' experience with post-Chernobyl thyroid cancer. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab* 2008;22:1061-73.
4. Saenko V, Ivanov V, Tsyb A, et al. The Chernobyl accident and its consequences. *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 2011;23:234-43.
5. Kurtio P, Seppä K, Pasanen K, et al. Fallout from the Chernobyl accident and overall cancer incidence in Finland. *Cancer Epidemiol* 2013;37:585-92.
6. Cardis E, Hatch M. The Chernobyl accident--an epidemiological perspective. *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 2011;23:251-60.
7. Aurengo A. Tchernobyl: quelles conséquences sanitaires ? *Le Jaune et le Rouge* 2001;569.
8. Ten Hoeve JE, Jacobson MZ. Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Energy Environ Sci* 2012;5:8743-57.
9. Steinhäuser G, Brandl A, Johnson TE. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts. *Sci Total Environ* 2014;470-471:800-17.
10. Bouville A, Linet MS, Hatch M, Mabuchi K, Simon SL. Guidelines for exposure assessment in health risk studies following a nuclear reactor accident. *Environ Health Perspect* 2014;122:1-5.
11. Mathews JD1, Forsythe AV, Brady Z, et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 2013;21:346:f2360.

RÉSUMÉ Conséquences sanitaires des événements nucléaires majeurs

Les bombardements de Hiroshima et Nagasaki, et les catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima ont été sélectionnés pour présenter les conséquences sanitaires à moyen et long termes d'irradiations de populations essentiellement dans les domaines de la cancérogenèse. Les observations cliniques combinées aux méthodes de l'épidémiologie et à celles, de plus en plus précises, encore récemment améliorées, de l'évaluation des doses reçues, ont permis l'élaboration de modèles doses-réponses pertinents devant permettre une prévision de risques. Toutefois, l'extrapolation des modèles aux faibles doses d'irradiation (< 0,1 gray) reste très incertaine.

SUMMARY Radiation-related health effects of major nuclear events

Three major nuclear events, the Hiroshima and Nagasaki bombings and the Chernobyl and Fukushima catastrophes, have been selected to illustrate the health consequences, observed or anticipated, of irradiation of populations. Differences in doses and modalities of irradiation, with the combination of clinical epidemiology and dose estimates, recently revisited, allow for more accurate dose-effect relationship models of the risks. However, extrapolation to the low-doses (< 0.1 Gy) or very low-doses of these models obtained with doses ≥ 0.2 Gy remains hazardous.